

jh210032-NAH

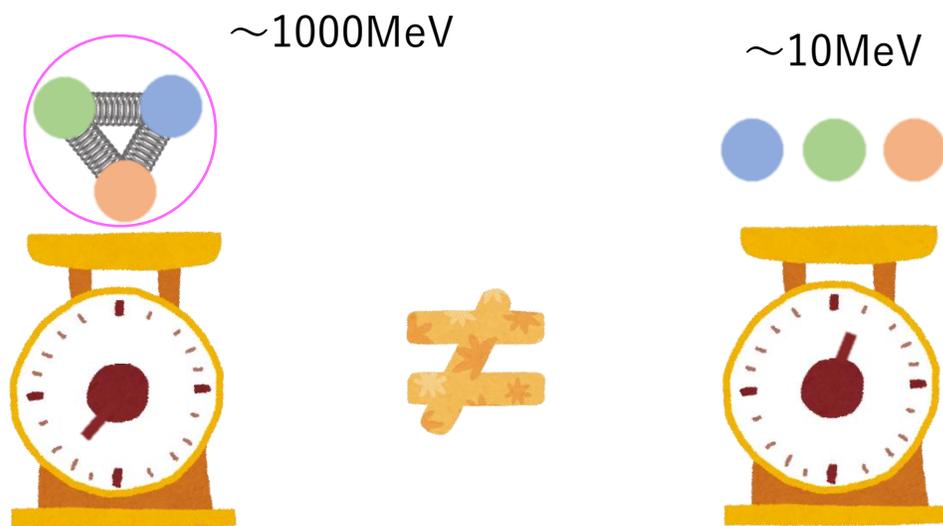
格子QCDによるスカラー中間子の質量 生成機構の研究

国士舘大学理工学部

課題代表者 関口 宗男

研究の背景 1 ハドロンの質量生成機構

ハドロンの質量 > 構成するクォークの質量



ハドロンはカイラル対称性の自発的破れと呼ばれる現象により質量を獲得する（有効理論）

「カイラル対称性の自発的破れによりハドロンが質量を獲得する過程」をシミュレーションで実証できれば、物質の質量起源のメカニズムを明らかにできる

共同研究に関する情報

拠点名 大阪大学

超大規模数値計算系応用分野

参加研究者（所属）役割分担

関口宗男（国士舘大学理工学部） 代表 研究統括・理論的考察・データの分析

若山将征（千葉工業大学） 副代表 コード開発・演算の実行・データ解析

伊達 進（大阪大学サイバーメディアセンター）

アルゴリズム・コード開発

中村純（大阪大学RCNP） アルゴリズム・コード開発

村上祐子（広島大学情報メディア教育研究センター） アルゴリズム・コード開発

和田浩明（国士舘大学理工学部） コード開発・演算の実行

研究の背景 2 カイラル対称性の回復

- 有限温度では、カイラル対称性の自発的破れの状態から、一部のカイラル対称性が回復する
- このとき、対になっている中間子の質量が縮退する

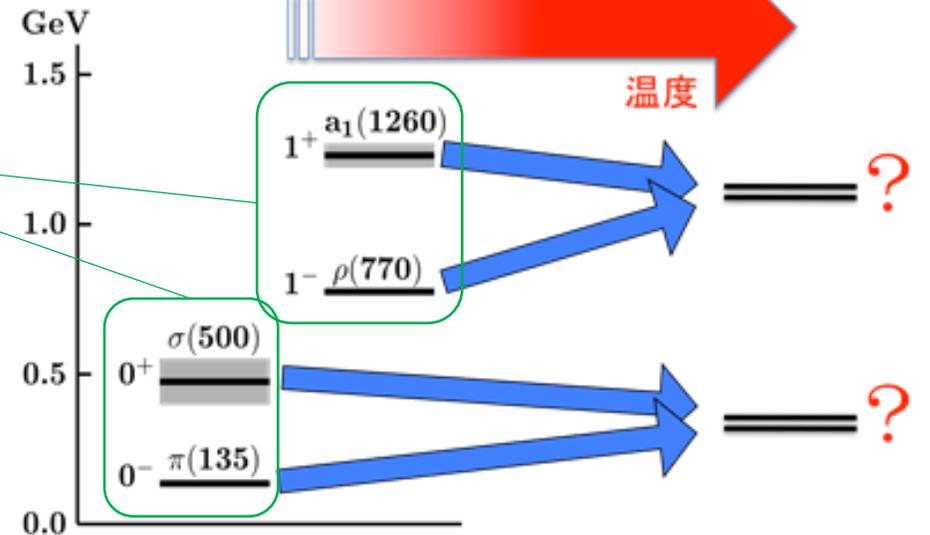


カイラル対称性の回復



カイラルパートナー

- この過程を第一原理計算で実証できれば、中間子質量の生成機構を説明することができる
- カイラル対称性を持つフェルミオンを計算できるコードの作成が必要

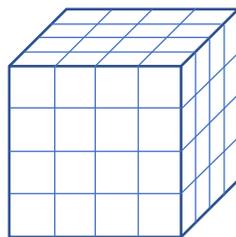


研究背景 3 カイラル対称性の導入による計算量の増大

カイラル対称性を取り入れたことにより計算量は増加する。阪大との共同研究によりチューニングをすすめて高速化を実現している。さらなる高速化が必要である。

従来:ウィルソフェルミオン作用

- クォークのもつカイラル対称性を再現しない
→シミュレーションできる物理現象に制限あり



例) 4次元空間座標をそれぞれ4等分した場合、ウィルソン作用で解く線型方程式の行列の次数は

$$3 \times 4 \times 4^4$$

クォークがもつ自由度 ↑ ↑ 4次元座標離散化における行列要素

新規:Truncated Overlap Fermion作用

- クォークのもつカイラル対称性を近似的に再現



N_5

- ウィルソフェルミオン作用にさらにパラメータ N_5 が一つ追加

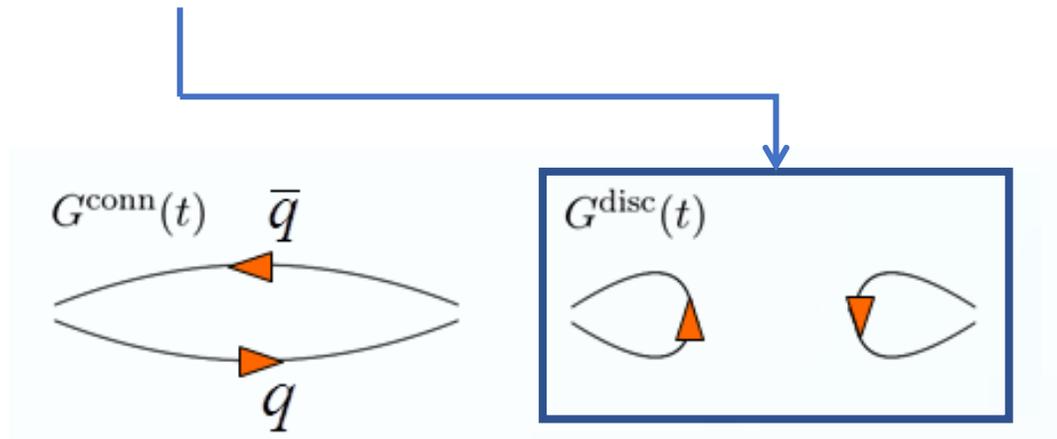
例) $N_5 = 32$ のとき、線形方程式の行列次数は

$$3 \times 4 \times 4^4 \times 32$$

- 計算コストが莫大になる

研究背景 4 アイソスカラー・スカラー 中間子 (σ 中間子) の構造

- σ 中間子の量子数は真空の量子数と同じ
- 非連結ダイアグラムの寄与がある



- クエンチ近似では計算することができない
- フルQCDでの計算が必要

研究目的

- 強い相互作用のカイラル対称性の自発的破れにより、クォークが質量を獲得すると同時に π 中間子（南部ゴールドストーン・ボゾン：質量は0）と σ 中間子、 ρ 中間子と a_1 中間子（これらの中間子はカイラル・パートナーと呼ばれる）も質量を獲得する。本研究では、特にこの中でアイソスカラー・スカラー粒子である σ 中間子の性質及び質量の生成機構での役割を第1原理であるQCDから明らかにすることを目標としている。
- 最終的には、臨界温度以上でカイラル対称性が部分的に回復し、カイラルパートナーの中間子の質量が縮退することを格子QCDによる大規模シミュレーションで再現することを目標とする。

令和3年度の研究課題

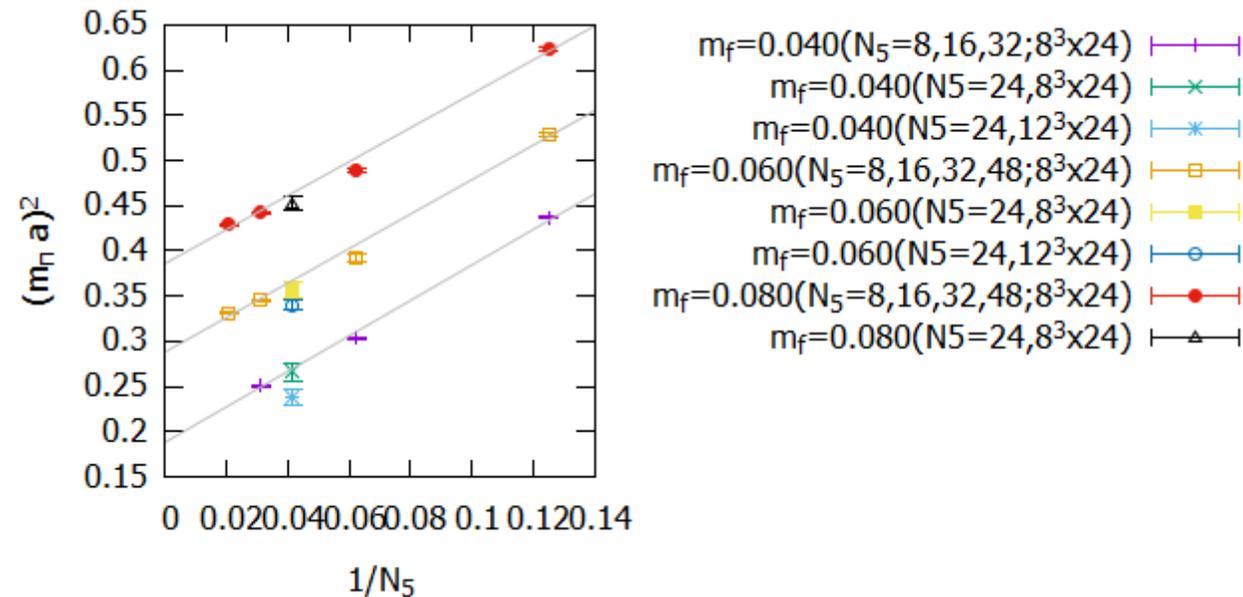
- (1) SU(N)用ウィルソン・フェルミオン (WF) 作用コードの高速化とフルQCDによる σ 中間子の質量生成機構の解明**
(JHPCNの研究リソースを利用する) 阪大SX-ACEで開発したプログラムをSX-Aurora TSUBASAに最適化する。並列化等の改良を実施する。
- (2) Truncated Overlap Fermion (TOF)作用コードの高速化とフルQCD用へ改良する** (JHPCNの計算機リソースを使用しない) TOF作用コードにもMass precondition法を導入する。SX-ACEで開発したプログラムをSX-Aurora TSUBASAに最適化する。並列化等の改良を実施する。

令和2年度の成果（1）

（1） TOF作用によるクエンチ近似シミュレーションにより5次元目の自由度の大きさによる π 中間子の質量 m_π 及び ρ 中間子の質量 m_ρ への影響を検討した。

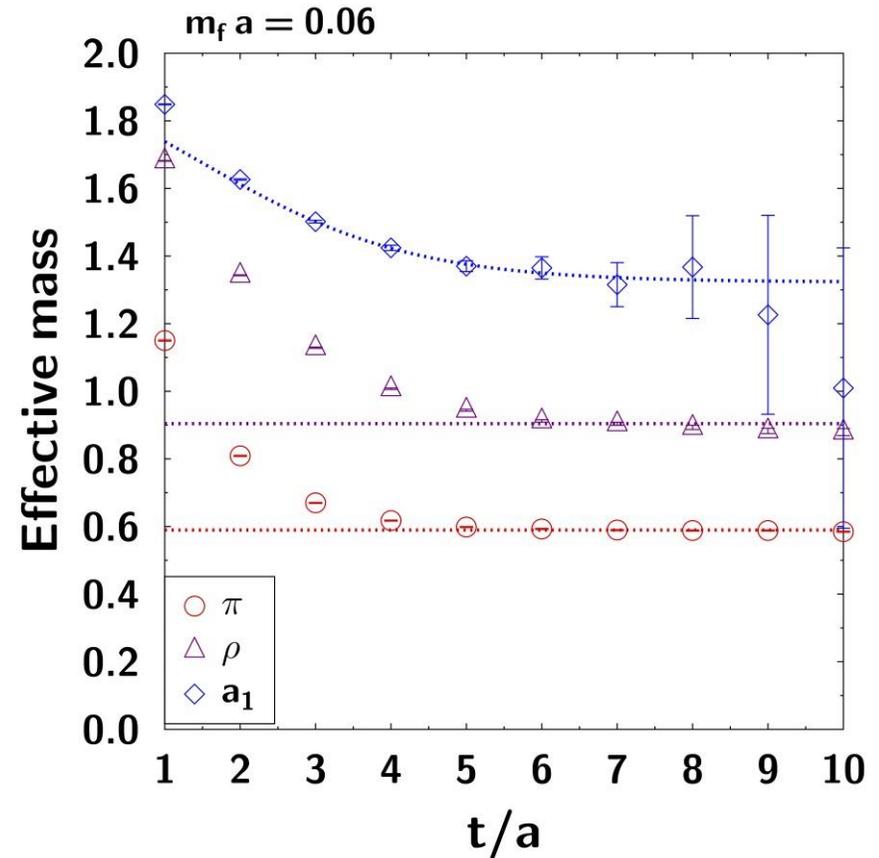
● $(m_\pi a)^2$ が $1/N_5$ の1次関数、 $m_\rho a$ が $1/N_5$ の1次関数になる傾向がみられた。

(Journal of Physics Communications (IOP) に投稿中)



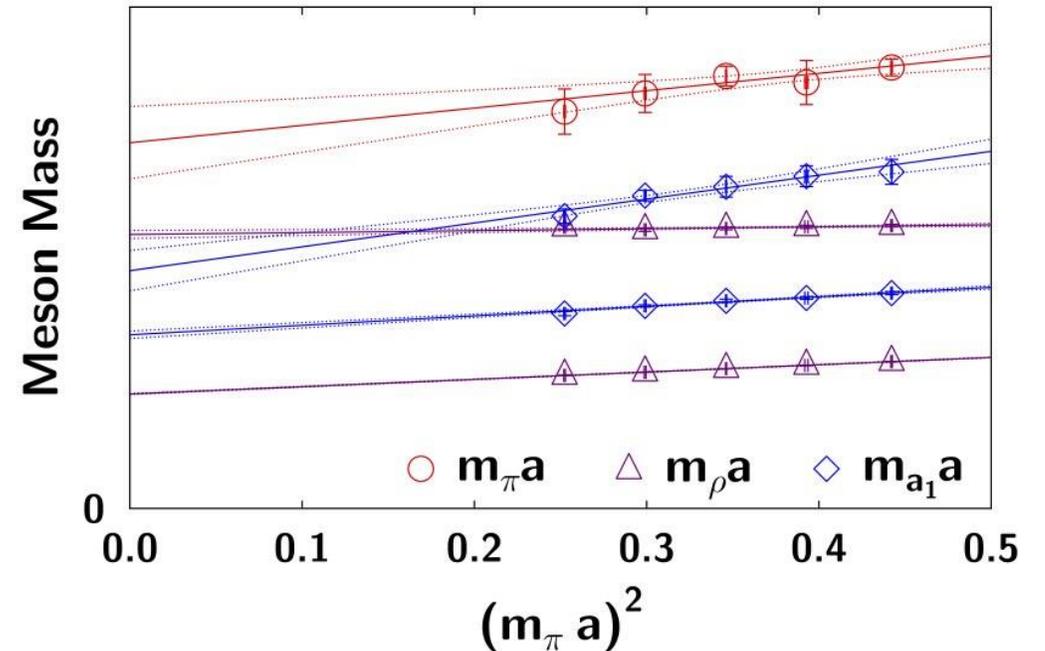
令和2年度の成果（2）

●2020年度までに実施したすべてのシミュレーションのデータを再解析して中間子励起状態を検討した。データ解析プログラムの改良し、 π 中間子、 ρ 中間子、 a_1 中間子の各励起状態の解析を実施した。



令和2年度の成果 (3)

- 右図の1番軽い質量が ρ 中間子の基底状態で、 $(m_\pi a)^2=0$ でみて質量の軽い順に a_1 中間子の基底状態、 a_1 の励起状態、 ρ の励起状態、 π 中間子の励起状態が得られた。
- 現在、論文を作成中、夏には投稿予定。



令和2年度の成果（4）

（2）プログラムコード開発

- ・ TOF作用コードの2度目の高速化へのアルゴリズムの見直しを実施、2019年のコードよりも10%程度計算速度が向上した。ベクトル化率99.85%。

- ・ WF作用コードにMass precondition法の導入をした。またSU(3)ゲージ理論用のコードをSU(N)ゲージ理論用に改良した。1/N展開等の有効理論との比較やQCDのプロトタイプであるSU(2)カラー理論のシミュレーションにも使用できるようになった。

研究業績

学術論文、会議プロシーディングス

1. Y. Murakami, M. Sekiguchi, H. Wada and M. Wakayama, Properties of five dimensions for the truncated overlap fermions , Journal of Physics Communications (投稿中) [査読付き].
2. H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, M. Wakayama, “Lattice study of meson properties at fine temperature using the truncated overlap fermions”, Proceedings of Science 363 045-1~7(2020) [査読付き].
3. M. Wakayama, . H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, “Spectroscopy of a_1 mesons from lattice QCD with the truncated overlap fermions ”, XVIII International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure, pp.104-108, August 2020, world Scientific
4. M. Wakayama, . H. Wada, Y. Murakami, A. Nakamura, M. Sekiguchi, “Mass of a_1 mesons from lattice QCD with the truncated overlap fermions, JPS Conference Proceedinngs 28 031007-1~4 (2019)[査読付き].
5. K.I.Ishikawa, I.Kanamori, Y.Murakami, A.Nakamura, M.Okawa and R.Ueno, “Non-perturbative determination of the Λ -parameter in the pure SU(3) gauge theory from the twisted gradient flow coupling,” Journal of High Energy Physics 1712, 067-1~26, (2017)[査読付き].
6. Y.Murakami and K.I.Ishikawa, “Construction of lattice Möbius domain wall fermions in the Schrödinger functional scheme,” Journal of Modern Physics, A 33 no.01, 1850012-1~38 (2017)[査読付き].
7. M.Wakayama, T.Kunihiro, S.Muroya, A.Nakamura, C.Nonaka, M.Sekiguchi and H.Wada,“Lattice QCD study of four-quark components of the isosinglet scalar mesons: Significance of disconnected diagrams,” Physcal Review D 91 094508-1~10 (2015)[査読付き].